УДК 62-83

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО ЧАСТОТНО-ФАЗОВОГО ДИСКРИМИНАТОРА НА ДИНАМИКУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

А.В. Бубнов

Омский государственный технический университет
Тел.: (381-2)-16-10-93

Проведен анализ влияния алгоритма работы импульсного частотно-фазового дискриминатора на динамику электропривода с фазовой синхронизацией. Рассмотрены различные алгоритмы разблокировки дискриминатора в режим фазового сравнения, при этом получены уравнения линий переключения в пропорциональный режим работы электропривода и определены области начальных условий, на основе метода фазовой плоскости проведено сравнение переходных режимов в электроприводе при различных алгоритмах работы логического устройства сравнения. Предложен вариант построения частотного дискриминатора на основе счетчика совпадающих входных импульсов.

При разработке электропривода для обзорно поисковых систем перспективными являются системы управления, работающие в режиме фазовой автоподстройки частоты вращения (ФАПЧВ) [1] (рис. 1, где ЧЗБ – частотно задающий блок, формирующий импульсы опорной частоты $f_{оп}$; ИДЧ – импульсный датчик частоты вращения, формирующий импульсы частоты обратной связи $f_{ос}$; ИЧФД – импульсный частотно-фазовый дискриминатор; КУ – корректирующее устройство; БДПТ – бесконтактный двигатель постоянного тока). Такие системы характеризуются высокими точностными

показателями, хорошими динамическими свойствами и широким диапазоном регулирования.

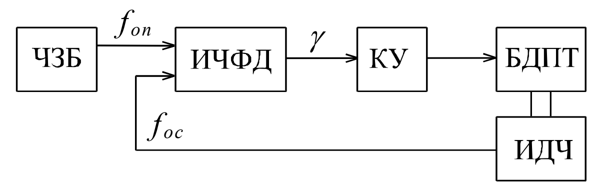


Рис. 1. *Структурная схема электропривода с фазовой синхронизацией*

В соответствии с принципом ФАПЧВ алгоритм функционирования импульсного частотно-фазового дискриминатора должен обеспечивать три режима работы электропривода: разгона с максимальным ускорением (при $f_{оп}>f_{ос}$), пропорциональный (линейный) (при $f_{оп}\approx f_{ос}$) и торможения с максимальным ускорением (при $f_{оп}<f_{ос}$). Реализация такого алгоритма работы электропривода обеспечивается благодаря наличию трех режимов работы ИЧФД: насыщения при разгоне, фазового сравнения и насыщения при торможении электропривода.

Для анализа динамических процессов в системах ФАПЧВ воспользуемся методом фазовой плоскости [2], при этом электропривод рассматривается как система с переменной структурой, и для каждой рабочей области строятся семейства фазовых траекторий.

На рис. 2 изображен фазовый портрет для режима синхронизации электропривода при различных начальных условиях. Фазовые траектории 1 и 2 соответствуют режиму разгона электропривода с последующей синхронизацией, а траектория 3 – режиму торможения электропривода. Направление движения на траекториях обозначено стрелками.

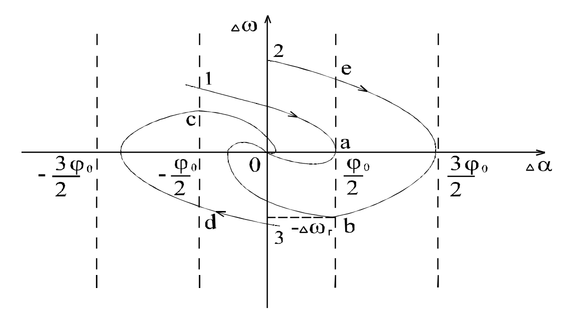


Рис. 2. *Фазовый портрет работы электропривода*

Начальные условия при переходе в пропорциональный режим работы электропривода расположены на линиях переключения [2]

$$\Delta\alpha = \frac{\varphi_0}{2} + \varphi_0 n$$

и при синхронизации электропривода в точке $\Delta\alpha$=0 определяются как начальные условия по:

– $\Delta\alpha$

$$\Delta\alpha = \pm\frac{\varphi_0}{2}, \qquad (1)$$

– $\Delta\omega$

$$0 \ge \Delta\omega > -\sqrt{2\varphi_0\varepsilon_m} = -\Delta\omega_r, \qquad (2)$$

где $\varphi_0=2\pi/z$ – угловое расстояние между двумя соседними метками ИДЧ, z – количество меток, n = 0, 1, 2, ..., ε_m – максимальное угловое ускорение в режимах разгона и торможения электропривода.

Выражения (1, 2) для начальных условий по $\Delta\alpha$ и $\Delta\omega$ в режиме фазового сравнения ИЧФД не зависят от заданной частоты вращения, а определяются только параметрами контура ФАПЧВ.

Импульсный частотно-фазовый дискриминатор с обычным алгоритмом работы [3] обеспечивает достаточно высокое качество переходных процессов в широком диапазоне регулирования частоты вращения при небольшом перерегулировании по $\Delta\omega$, не превышающем $\Delta\omega_r$ [2]. В то же время известны технические решения построения электроприводов с фазовой синхронизацией, в которых осуществляется дополнительная принудительная разблокировка ИЧФД, и в результате улучшается качество регулирования при вхождении контура ФАПЧВ в синхронизм.

На фазовой плоскости изменение алгоритма регулирования отображается в изменении расположения и вида линий переключения и, следовательно, областей начальных условий для режима вхождения в синхронизм. Поэтому сравнительный анализ способов регулирования электропривода с фазовой синхронизацией удобно проводить с использованием метода фазовой плоскости. Для удобства сравнения различных способов регулирования электропривода примем следующие допущения:

1) при различных алгоритмах регулирования электропривода в режиме фазового сравнения система управления линеаризуется и сводится к структурной схеме линейной системы автоматического регулирования с одинаковыми параметрами корректирующего устройства;
2) токоограничение электродвигателя не учитывается;
3) внешние возмущения при анализе динамических процессов не учитываются.

Принудительная разблокировка ИЧФД может осуществляться по сигналу дополнительного частотного дискриминатора (ЧД). При этом может осуществляться разблокировка схемы логической блокировки (ЛБ) внутри ИЧФД (рис. 3, *а*) через нелинейный элемент (НЭ) типа реле с зоной нечувствительности [3], или, при использовании дополнительного частотного дискриминатора (рис. 3, *б*), возможна разблокировка ИЧФД с помощью импульса, формируемого на выходе одновибратора ОВ [4].

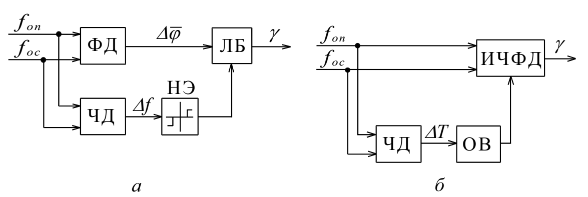


Рис. 3. *Варианты структурных схем логического устройства сравнения*

Практическая реализация частотного дискриминатора может осуществляться на основе схемы сравнения сигналов, пропорциональных частотам $f_{оп}$ и $f_{ос}$ (рис. 4, *а*, где ПЧН – преобразователь частота-напряжение) [3]? или их периодам $T_{оп}$ и $T_{ос}$ (рис. 4, *б*, где ППК – преобразователь период-код, УС – устройство сравнения, f_0 – частота следования импульсов высокочастотного генератора) [4].

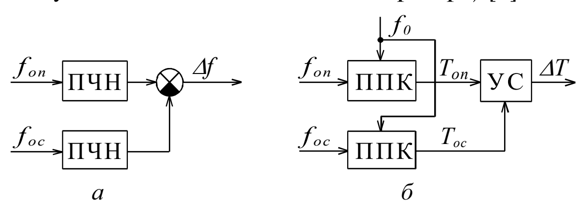


Рис. 4. *Варианты структурных схем импульсного частотного дискриминатора*

В схеме, представленной на рис. 3, *а*, ИЧФД выполнен в виде фазового дискриминатора ФД со схемой ЛБ, разблокировка которой осуществляется по сигналу с выхода ЧД. При этом выходной сигнал импульсного частотно-фазового дискриминатора γ равен выходному сигналу фазового дискриминатора $\Delta\overline{\varphi}$ при частотном рассогласовании импульсов $f_{оп}$ и $f_{ос}$ $|\Delta f|<\Delta f_0$, где Δf_0 – величина зоны нечувствительности НЭ. Линии переключения при таком алгоритме работы описываются выражением

$$\Delta\omega = \pm\Delta\omega_0, \qquad (3)$$

где $\Delta\varphi_0=\varphi_0\Delta f_0$, а область начальных условий

$$\begin{cases} |\Delta\omega| = \Delta\omega_0 \\ -\varphi_0/2 < \Delta\alpha \le \varphi_0/2. \end{cases} \qquad (4)$$

На фазовом портрете (рис. 5) изображены три фазовые траектории для режима разгона электропривода с различными начальными условиями по $\Delta\alpha$ в момент разблокировки.

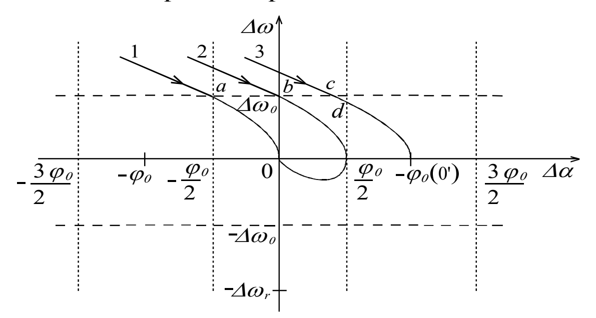


Рис. 5. *Фазовый портрет работы электропривода с опережающей разблокировкой через нелинейный элемент*

В таких системах возможна синхронизация на частотах, близких к заданной, так как линейная область работы электропривода не ограничена по $\Delta\alpha$. Этот недостаток устранен в схеме логического устройства сравнения, приведенной на рис. 3, *б*, в которой осуществляется принудительная разблокировка ИЧФД коротким импульсом с выхода дополнительного ЧД. В этом случае возможен повторный переход ИЧФД в режим насыщения при $|\Delta\omega|<\Delta\omega_0$, однако полностью исключается возможность синхронизации на близкой частоте. На фазовом портрете (рис. 6) повторному переходу импульсного частотно-фазового дискриминатора в режим насыщения соответствует участок *c-d* фазовой траектории 2.

Для определения величины $\Delta\omega_0$ при использовании схемы, приведенной на рис. 4, *б*, воспользуемся неравенством

$$T_{оп} + T_0 > T_{ос} > T_{оп} - T_0,$$

где $T_0=1/f_0=T_{оп}/N$, $N=f_0/f_{оп}$ – код периода опорной частоты $f_{оп}$.

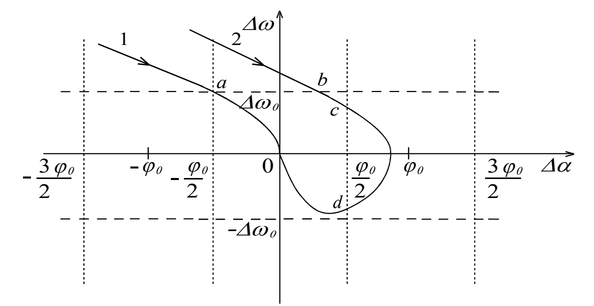


Рис. 6. *Фазовый портрет работы электропривода с опережающей разблокировкой от дополнительного частотного дискриминатора*

Это неравенство справедливо при равенстве кодов, пропорциональных периодам сравниваемых частот, на входе устройства сравнения с точностью до младшего разряда.

Для обратных величин можно записать

$$1/(T_{оп} - T_0) > 1/T_{ос} > 1/(T_{оп} + T_0), \text{ Ł°Ł}$$

$$f_{оп}/(1-\sigma) > f_{ос} > f_{оп}/(1+\sigma),$$

где $\sigma=T_0/T_{оп}=1/N$.

После преобразования получаем

$$f_{оп}\left(1+\frac{\sigma}{1-\sigma}\right) > f_{ос} > f_{оп}\left(1-\frac{\sigma}{1+\sigma}\right),$$

или с учетом того, что $\sigma<<1$:

$$f_{оп} + \Delta f > f_{ос} > f_{оп} - \Delta f,$$

где $\Delta f \approx f_{оп}\sigma$.

Тогда $\omega_з+\Delta\omega_0>\omega>\omega_з-\Delta\omega_0$,

где $\Delta\omega_0=\varphi_0\Delta f\approx\varphi_0 f_{оп}\sigma=\omega_э\sigma$, $\omega_з$ – заданная угловая скорость электродвигателя.

С учетом того, что $\sigma=f_{оп}/f_0=\omega_э/(\varphi_0 f_0)$, получаем

$$\Delta\omega_0 = \omega^2/(\varphi_0 f_0), \qquad (5)$$

то есть расположение линий переключения и, соответственно, начальных условий по $\Delta\omega$ на фазовой плоскости очень сильно зависит от заданной частоты вращения электропривода.

Аналогично, если определение сигнала $\Delta\omega_0$ осуществляется путем вычитания сигналов, пропорциональных сравниваемых частотам $f_{оп}$ и $f_{ос}$ с выходов ПЧН (рис. 4, *а*), то также практически невозможно обеспечить постоянство $\Delta\omega_0$ в широком ди-

апазоне рабочих частот вращения вследствие сравнительно невысокой точности преобразования частоты вращения в напряжение.

Значительное изменение $\Delta\omega_0$ в зависимости от рабочей частоты вращения приводит к значительному расширению области начальных условий по $\Delta\omega$ и к ухудшению качества регулирования электропривода, так как большие частотные рассогласования не могут быть отработаны в пределах одной линейной зоны фазового дискриминатора.

Аналогичные результаты позволяет получить более простая в реализации схема ЧД [5], алгоритм работы которой основан на определении ситуации повторного наложения во времени входных импульсов ЧД. В этом случае выполнение частотного дискриминатора в виде схем И, ИЛИ-НЕ и двух двухразрядных счетчиков импульсов (рис. 7, где ФКИ – формирователь коротких импульсов стабильной длительности τ) позволяет сформировать линии переключения

$$\Delta\alpha = \varphi_0/2 \pm \varphi_0 n \qquad (6)$$

и начальные условия

$$\begin{cases} |\Delta\omega| \le \Delta\omega_0 \\ \Delta\alpha \approx \pm\varphi_0/2, \end{cases} \qquad (7)$$

причем разблокировка ИЧФД производится не после изменения знака $\Delta\omega$, а непосредственно перед этим изменением.

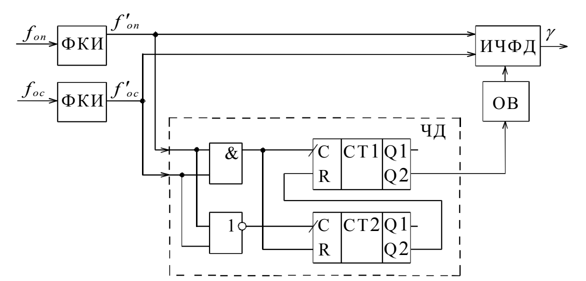


Рис. 7. *Структурная схема логического устройства сравнения со счетчиком совпадающих входных импульсов*

Фазовый портрет работы такой системы регулирования в режиме разгона электропривода при различных начальных условиях по $\Delta\omega$ приведен на рис. 8. Разблокировка ИЧФД осуществляется с опережением в точках *a* и *b*.

Работа ЧД основана на определении момента времени, когда произойдет совпадение во времени входных импульсов f'_{on} и f'_{oc} длительностью τ не менее двух раз подряд. Совпадение во времени входных импульсов определяется с помощью логического элемента И, а количество таких повторных совпадений подсчитывается первым двухразрядным счетчиком импульсов СТ1. Второй счетчик СТ2 подсчитывает количество повторно совпадающих пауз, определяемых с помощью логического элемента ИЛИ-НЕ между повторными наложениями входных импульсов. Если такое количество совпадений пауз превышает единицу, то счетчик СТ1 по сигналу с выхода Q2 счетчика СТ2 устанавливается в ноль, и разблокировки ИЧФД не происходит. Если же повторное совпадение импульсов произошло на следующем такте f_{on}, то появляется единица на выходе Q2 счетчика СТ1, по которой срабатывает одновибратор ОВ, осуществляющий разблокировку ИЧФД в пропорциональный режим работы.

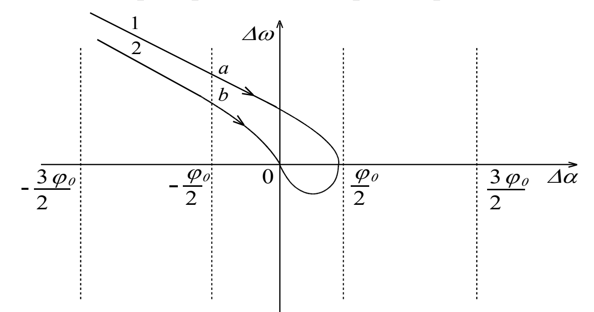


Рис. 8. *Фазовый портрет работы электропривода с частотным дискриминатором на основе счетчика совпадающих входных импульсов*

В этом случае периоды сравниваемых частот отличаются друг от друга на величину, не превышающую 2τ, то есть $T_{on}+2\tau>T_{oc}>T_{on}-2\tau$. Для обратных величин можно записать

$$1/(T_{on}-2\tau) > 1/T_{oc} > 1/(T_{on}+2\tau)$$

или

$$f_{on}/(1-\sigma') > f_{oc} > f_{on}/(1+\sigma'),$$

где $\sigma'=2\tau/T_{on}$. После преобразования получаем

$$f_{on}\left(1+\frac{\sigma'}{1-\sigma'}\right) > f_{oc} > f_{on}\left(1-\frac{\sigma'}{1+\sigma'}\right)$$

или с учетом того, что $\sigma'<<1$,

$$f_{on}+\Delta f' > f_{oc} > f_{on}-\Delta f',$$

где $\Delta f'\approx f_{on}\sigma'$, или

$$\omega \ + \Delta\omega_0' > \omega > \omega \ - \Delta\omega_0',$$

где $\Delta\omega_0'\approx\omega_з\sigma'$.

С учетом того, что $\sigma'=2\tau f_{on}=2\tau\omega_з/\varphi_0$, получаем выражение для $\Delta\omega_0'$, аналогичное (5)

$$\Delta\omega_0' = 2\tau\,\omega^2/\varphi_0 . \qquad (8)$$

Таким образом, ошибка по частоте вращения $\Delta\omega$ при повторном совпадении входных импульсов ЧД лежит в пределах $|\Delta\omega|<\Delta\omega_0$. В то же время совпадение импульсов f_{on} и f_{oc} свидетельствует о работе дискриминатора на границе линейной зоны, то есть при $\Delta\alpha\approx\varphi_0/2$, что подтверждает правильность выражений для начальных условий (7).

При выборе $\Delta\omega_0'$ равным $\Delta\omega_r$ может быть достигнут максимальный эффект в плане повышения быстродействия по сравнению с обычным алгоритмом работы ИЧФД. Максимальное время сокращения переходного процесса определится временем прохождения изображающей точки участка *e*-*b* фазовой траектории 2 (рис. 2), так как разблокировка ИЧФД произойдет не в точке *b* (как в обычном ИЧФД), а в точке *e*.

При этом экономия времени составит $t_{Эмах}=4\varphi_0/\Delta\omega_r$ [2], и в зависимости от начальных условий по можно записать

$$0 < t_э \leq 4\varphi_0/\Delta\omega_r .$$

Зависимость $\Delta\omega_0'$ от заданной частоты вращения (8) приводит к тому, что в области рабочих частот, где $\Delta\omega_0'<\Delta\omega_r$, срабатывание ЧД будет происходить только при $|\Delta\omega|\leq\Delta\omega_0'$, а в области начальных условий $\Delta\omega_0'<\Delta\omega\leq\Delta\omega_r$ ЧД не сработает, и разблокировка ИЧФД произойдет только после смены знака $\Delta\omega$ в соответствии с алгоритмом работы дискриминатора. При $\Delta\omega_0'>\Delta\omega_r$ и больших начальных условиях по $\Delta\omega$ синхронизация невозможна в пределах одной линейной зоны ФД, что приводит к снижению быстродействия электропривода, так как изображающая точка проходит по фазовым траекториям различных линейных зон.

Рассмотренные алгоритмы работы ИЧФД с его дополнительной принудительной разблокировкой позволяют несколько снизить перерегулирование в электроприводе с фазовой синхронизацией, однако их эффективное использование возможно только в узком диапазоне рабочих частот вращения электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трахтенберг Р.М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. – М.: Энергоиздат, 1982. – 168 с.
2. Бубнов А.В. Исследование режима синхронизации в контуре фазовой автоподстройки частоты вращения. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1999. – 21 с. – Деп. в ВИНИТИ 23.12.99, № 3805-В59.
3. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
4. А.с. 1280635 СССР. МКИ[4] Н02Р 5/06. Электропривод постоянного тока / В.М. Сбоев, Н.А. Завражных, А.П. Протасов. – 3 с.: ил.
5. А.с. 1624649 СССР. МКИ[5] Н02Р 5/06. Стабилизированный электропривод / А.В. Бубнов, Б.М. Ямановский. – 4 с.: ил.